

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 562 785**

②1 N° d'enregistrement national : **84 05903**

⑤1 Int Cl<sup>a</sup> : A 61 B 5/05; G 01 N 24/08; H 01 F 3/10.

⑫ **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

**A1**

②2 Date de dépôt : 13 avril 1984.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la  
demande : BOPI « Brevets » n° 42 du 18 octobre 1985.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux appa-  
rentés :

⑦1 Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-  
MIQUE, Etablissement de caractère scientifique, tech-  
nique et industriel. — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : Christian Jeandey et Edmond Tournier.

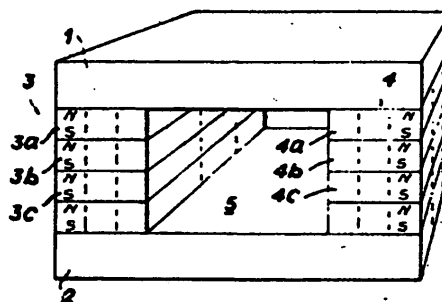
⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : Brevatome.

⑤4 Système à aimants permanents destiné à l'imagerie par résonance magnétique nucléaire, notamment pour l'examen du corps humain.

⑤7 Système à aimants permanents destiné à l'imagerie par résonance magnétique nucléaire, notamment pour l'examen du corps humain.

Il comporte deux pièces polaires horizontales opposées et parallèles 1, 2 en forme de parallélépipède rectangle, en un matériau ferromagnétique de très forte perméabilité positionnées l'une au-dessus de l'autre et polarisées à un potentiel magnétique par deux blocs parallélépipédiques de matériaux aimantés 3, 4 définissant entre eux et avec les pièces polaires un entrefer central 5 de forme également parallélépipédique servant de logement au corps humain à examiner.



SYSTEME A AIMANTS PERMANENTS DESTINE A L'IMAGERIE  
PAR RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE, NOTAMMENT POUR  
L'EXAMEN DU CORPS HUMAIN

5 La présente invention se rapporte aux techniques d'imagerie par la méthode dite de résonance magnétique nucléaire (RMN) actuellement en voie de développement rapide, notamment pour l'examen du corps humain, dont elle permet d'obtenir des images d'une qualité et d'une précision inconnues jusqu'ici avec les  
10 méthodes de la radiologie classique aux rayons X.

La méthode d'imagerie RMN utilise la propriété de résonance magnétique nucléaire de certains noyaux présents dans le corps humain, essentiellement les protons répartis dans tout l'organisme et quelques  
15 noyaux d'intérêt biologique mais en abondance beaucoup moins grande tels que le phosphore ( $^{31}\text{P}$ ), le potassium ( $^{39}\text{K}$ ), le sodium ( $^{23}\text{Na}$ ).

Une installation de RMN médicale se compose principalement d'un électro-aimant dont les bobines  
20 ont un diamètre suffisant pour entourer le crâne du patient ou son corps. Cet électro-aimant produit un champ magnétique statique uniforme dirigé dans l'axe du corps. Une bobine permet de superposer au champ permanent un champ tournant dans le plan perpendiculaire à l'axe. Les images sont obtenues en faisant  
25 résonner les noyaux d'hydrogène ou protons, contenus dans les tissus biologiques. Cette résonance est possible parce que chaque proton se comporte comme un microscopique aimant.

30 Lorsque l'on applique le champ statique, les spins s'orientent tous parallèlement à l'axe du champ. Ils n'ont donc plus que deux orientations possibles : dans le sens du champ ou en sens contraire. Lorsqu'on applique en plus le champ tournant, si sa fréquence

est quelconque, il ne se passe rien. Mais si on l'accorde sur la fréquence propre des protons ceux-ci vont entrer en résonance.

5 Le signal de résonance détecté est proportionnel à l'aimantation des noyaux placés dans un champ magnétique de polarisation. L'observation du phénomène de résonance requiert donc la présence d'un champ magnétique de très grande uniformité dans tout le volume à imager. Le codage spatial de l'image est  
10 ensuite réalisé par la superposition de gradients de champ magnétique linéaires de durée et d'amplitude variables dans les trois directions de l'espace.

Un des composants principaux de l'imageur RMN est l'aimant générateur du champ magnétique continu nécessaire à la polarisation (aimantation) des  
15 noyaux de la zone à imager. Les qualités demandées à l'aimant sont les suivantes :

- valeur élevée du champ (entre 0,1 et 2,5 Tesla),
- uniformité meilleure que  $10^{-5}$  (dans un volume de  
20 400 mm de diamètre),
- stabilité du champ à long et court terme.

Parmi les solutions retenues actuellement, on peut citer ;

- les aimants "résistifs" constitués de bobinages en conducteurs électriques résistants, dans lesquels  
25 la puissance dissipée par effet Joule (quelques dizaines de kW) doit être évacuée par des circuits de refroidissement appropriés ;
- les cryo-aimants constitués de bobinages supraconducteurs devant être maintenus à très basse température (quelques degrés Kelvin) ;
- les électroaimants dans lesquels une partie du flux magnétique produit par des bobines est canalisé dans un circuit magnétique généralement en acier ;
- 30 - les aimants permanents dans lesquels le flux d'induction est fourni par des substances ferromagnétiques dites dures, c'est-à-dire à large cycle d'hystérésis.

La solution des aimants permanents offre plusieurs avantages par rapport aux précédentes. On peut mentionner :

- le coût d'exploitation réduit ;
- 5 - l'orientation du champ magnétique qui est transverse (perpendiculaire à l'axe du patient) ce qui permet l'utilisation d'antennes d'émission-réception solénoïdales qui ont un facteur de mérite (homogénéité du champ HF et meilleur coefficient de remplissage)
- 10 deux fois plus grand que celui des antennes en selle de cheval. Les avantages de cette configuration ayant trait à un aimant résistif sont décrits dans le brevet français n° 80 02497,
- la stabilité intrinsèque du champ meilleure à condi-
- 15 tion de contrôler les dérives thermiques,
- une plus grande sécurité de fonctionnement par rapport aux coupures du secteur ou à la transition brutale des supraconducteurs en cas d'élévation subite de température ("quenching"), d'où un risque d'acci-
- 20 dents moins élevé,
- un champ de fuite réduit par suite du retour du flux dans un circuit magnétique et corrélativement influence moindre des objets magnétiques extérieurs sur la distribution du champ à l'intérieur de l'ai-
- 25 mant (ascenseurs, tramways, etc...).

Néanmoins, l'un des inconvénients majeurs de cette solution est lié au circuit magnétique qui peut atteindre des poids considérables (90 tonnes chez Fonar, fabricant américain). Un autre inconvénient est

30 la valeur relativement basse du champ (0,2 à 0,3 Tesla).

Une structure classique d'aimants permanents à grande homogénéité de champ pour l'analyse de petits échantillons de quelques  $\text{cm}^3$  par résonance magnétique nucléaire a été décrit par J.T. ARNOLD, Phy-

35

sical Review vol.102, n°1, 1956 p.136 à 150 ou H.S. GUTOWSKY, L.H.MEYER and R. E. Mc CLURE dans Review of Scientific Instruments vol.24, n°8, p.644 à 652).

Des inhomogénéités inférieures à  $10^{-6}$  ont ainsi pu être obtenues dans des entrefers de quelques dizaines de mm pour des rapports largeurs de poles sur entrefer souvent supérieurs à 5.

Une telle structure présente de nombreux handicaps :

1) le volume des aimants inducteurs est très important pour respecter un rapport largeur sur entrefer convenable (2 à 3 au minimum) et pour tenir compte du flux de fuite. Des considérations sur l'énergie stockée dans l'aimant par rapport à l'énergie magnétique contenue dans l'entrefer permettent d'optimiser le volume de l'aimant  $V_a$ .

$$V_a = \sigma \frac{\mu_0 H_0^2 V_0}{B_a H_a} \quad (1)$$

$V_a$  = volume de l'aimant  
 $V_0$  = volume de l'entrefer  
 $\mu_0$  = perméabilité du vide ou de l'air  
 $\sigma$  = facteur de dispersion (ici compris entre 2 et 3) incluant les pertes dans le circuit magnétique  
 $B_a H_a$  = produit représentant l'énergie stockée dans l'aimant à son point de fonctionnement.

Pour les aimants modernes dont le  $(BH)_{\max}$  se situe à  $B_a = B_r/2$  ( $B_r$  induction rémanente de l'aimant), la hauteur optimale des aimants est environ 2 fois la largeur d'entrefer, dans ce type de structure ( $L_a \cong \sigma \cdot L_0$ ).

2) La carcasse de fermeture du flux est très grande. Le poids de l'aimant est triplé ou quadruplé par

rapport à celui des blocs inducteurs.

3) le montage mécanique devant assurer un très bon parallélisme des pièces polaires ( $\pm 10 \mu\text{m}$ ) est délicat à réaliser.

5           La présente invention a précisément pour objet un système à aimants permanents destiné à l'imagerie par résonance magnétique nucléaire qui permet de diminuer considérablement le poids de matériaux ferromagnétiques utilisés tout en répondant par ailleurs  
10 aux exigences que l'on est en droit d'attendre de ce type de système magnétique.

          Ce système à aimants permanents se caractérise essentiellement en ce qu'il comporte deux pièces polaires horizontales opposées et parallèles, en forme  
15 de parallélépipède rectangle, en un matériau ferromagnétique de très forte perméabilité, positionnées l'une au-dessus de l'autre et polarisées à un potentiel magnétique par deux blocs parallélépipédiques de matériaux aimantés définissant entre eux et avec les  
20 pièces polaires un entrefer central de forme également parallélépipédique servant de logement au corps humain à examiner.

          La structure objet de l'invention consiste donc principalement comme on le voit à faire jouer aux  
25 pièces polaires, de surface identique à celle de l'aimant classique, à la fois le rôle de surface équipotentielle magnétique et de circuit magnétique acheminant le flux vers l'entrefer où l'on place le patient. Par ailleurs, le volume inutile de l'entrefer entre les deux pièces polaires, c'est-à-dire en dehors  
30 de la zone centrale où se situe le tunnel proprement dit d'introduction du patient à examiner, est utilisé pour placer les blocs aimantés générateurs de l'induction magnétique du circuit.

35           Dans la structure objet de l'invention, les

5 pièces polaires sont positionnées et polarisées à un potentiel magnétique par les deux blocs parallélépipédiques de matériau aimanté placés de part et d'autre de l'entrefer, la direction d'aimantation de ces blocs étant antiparallèle à la direction de l'induction dans l'entrefer. Cet entrefer, dans lequel on introduit le patient prend ainsi la forme d'un tunnel parallélépipédique dont le plancher et le plafond sont les pièces polaires et dont les deux parois latérales sont les blocs de matériau aimanté générateur de l'induction.

10 En première approximation les deux pièces polaires constituent deux surfaces équipotentielles portées à deux potentiels magnétiques différents par les blocs de matériau aimanté.

15 Le flux magnétique débité par les blocs aimantés est canalisé par les pièces polaires et se referme en sens inverse à l'intérieur du tunnel pour la partie utile et en flux de fuite à l'extérieur de l'aimant.

20 La polarisation des pièces polaires engendre une induction  $B_0$  dans le tunnel et un champ démagnétisant  $H_a$  dans les blocs aimantés.

25 Le volume nécessaire d'aimants pour magnétiser l'entrefer s'obtient à partir de l'équation donnée page 4. La hauteur des aimants étant celle de l'entrefer la surface optimale d'aimants à base de matériaux modernes (fort champ coercitif par rapport à l'aimantation) devient  $S_a \sim \sigma S_0$  avec

$S_a$  = surface totale portante des aimants

30  $S_0$  = surface utile de l'entrefer

$\sigma$  = facteur de dispersion ( $1,5 < \sigma < 2$ )

Dans la pratique le facteur de dispersion est plus petit que celui d'une structure classique.

35 Les principaux avantages de la structure objet de l'invention sont les suivants :

- Pour un entrefer donné et une zone homogène équivalente, le volume d'aimant nécessaire est réduit de 30% à 50% (dans la même proportion que les facteurs de dispersion) par rapport aux solutions antérieures.

- Le volume et le poids du circuit magnétique (se réduisant aux seules pièces polaires dans le cas de l'aimant intégré) sont diminués d'un facteur 2 à 3. Cette remarque prend toute son importance dans le cas où l'on cherche à obtenir des inductions plus fortes, de l'ordre de 0,5 T, dans l'entrefer en utilisant des matériaux nouveaux (les NEOMAX par exemple) qui ont des inductions rémanentes de 1,2 Tesla. En effet, les inductions dans la pièce polaire (fer) ne doivent pas dépasser 0,3 à 0,5T pour assurer une bonne répartition des lignes de flux dans l'entrefer.

- Le montage mécanique est simplifié : une construction par simple empilement est réalisée, le parallélisme des pièces polaires étant assuré par ajustement des hauteurs des blocs magnétisants eux mêmes constitués de briques. De plus les coefficients de dilatation des aimants céramiques particulièrement des aimants à base d'alliage  $\text{SmCo}_5$  et NEOMAX sont 2 à 3 fois plus faibles que ceux de l'acier, ce qui assure une meilleure stabilité en température du champ.

Les hauteurs équivalentes des montants latéraux ou blocs aimantés sont aussi 2 à 3 fois plus courtes par rapport à ceux d'une structure classique.

Des passages latéraux peuvent être pratiqués entre les colonnes d'aimants, ainsi que des trous de petits diamètres dans les pièces polaires pour des motifs de centrage du patient ou pour des irradiations simultanées en cours d'examen.

La structure objet de l'invention présente néanmoins quelques inconvénients par rapport aux solu-



tions classiques si on l'exploite sans précautions particulières et dans la configuration simple qui vient d'être décrite précédemment. Parmi ces défauts, on peut mentionner en particulier les suivants :

5           - les pièces polaires, qui assurent le rôle de carcasse en conduisant latéralement le flux magnétique depuis les blocs aimantés jusqu'à l'entrefer, sont le siège d'une différence de potentiel magnétique provoquée par leur réluctance non nulle. Cette différence de potentiel provoque à son tour une distorsion du champ en "barillet" conduisant à une diminution de quelques  $10^{-3}$  en valeur relative de l'induction dans l'entrefer.

10           Cette distorsion du champ en "barillet" est d'ailleurs partiellement compensée par une autre distorsion, due aux fuites magnétiques à la périphérie des pièces polaires, celle-là en forme de "tonneau" et conduisant à une augmentation du champ au centre de l'entrefer,

15           - la forme des pièces polaires qui doivent alimenter en flux un tunnel parallélépipédique et qui sont rectangulaires (ou carrées). La forme circulaire qui serait plus favorable pour l'homogénéité résultante des effets de fuite, ne peut cependant être adoptée,

20           - la dispersion d'aimantation des briques aimantées constituant les blocs induisent des inductions parasites qui ne sont pas entièrement filtrées par les pièces polaires comme dans le cas des structures classiques,

25           - l'influence des objets ferromagnétiques externes est plus grande que dans la structure classique du fait que les lignes de fermeture du champ de fuite s'étendent plus loin. Cependant, ces effets perturbateurs se traduisent plus par des variations glo-

bales que par des distorsions du champ (filtre des pièces polaires).

5 Selon l'invention, des moyens sont prévus pour corriger les différents défauts rappelés ci-dessus de la structure aimantée, objet de l'invention. Ces défauts qui se traduisent toujours en fin de compte par des inhomogénéités dans le champ magnétique créé dans l'entrefer, peuvent se classer en deux catégories selon que ces inhomogénéités sont liées à la 10 structure supposée géométriquement parlant parfaite ou selon qu'elles sont liées à des imperfections locales des matériaux constituant cette structure ou de cette structure elle-même. Dans le premier cas, les défauts constatés, qui sont en général de fréquence 15 spatiale basse, peuvent être compensés par des actions globales similaires pour tous les aimants ; pour la seconde catégorie de défauts, qui sont en général d'une fréquence plus élevée dans l'espace, la compensation ne peut se faire que sur place, cas par cas, 20 pour chaque aimant particulier.

Selon l'invention, le système à aimants permanents envisagé comporte des anneaux de garde en matériau ferromagnétique et/ou des blocs aimantés répartis sur la périphérie externe pour compenser la fuite 25 du flux magnétique à la périphérie des pièces polaires.

Selon une autre caractéristique de l'invention, qui vise la compensation de la chute de potentiel magnétique dans les pièces polaires du système 30 aimanté, ce dernier comporte au moins l'un des moyens choisis dans le groupe comprenant des bandes de matériau à grande perméabilité placées dans l'entrefer selon la zone médiane des pièces polaires, des bobinages encerclant les pièces polaires et parcourus par un 35 courant dont le sens crée une force magnétomotrice

opposée à la chute de potentiel magnétique, des pièces polaires divisées horizontalement par un petit entrefer en deux plaques dont la plaque extérieure est entourée de bobines parcourues par un courant.

5            Selon une autre caractéristique de l'invention, le système à aimants permanents comporte, placé contre les parois verticales de l'entrefer, des aimants compensateurs de l'inhomogénéité des blocs de matériaux aimantés.

10           Selon une variante de la réalisation précédente, les aimants compensateurs sont réalisés par collage sur une plaque support amagnétique de petits aimants parallélépipédiques standard, dont la répartition et le sens sur le support sont choisis en fonction des défauts repérés dans la carte de l'induction  
15           dressée selon des plans verticaux parallèles aux parois des blocs de matériaux aimantés.

          Enfin dans une variante perfectionnée du système à aimants permanents objet de l'invention, les  
20           pièces polaires sont recouvertes de plaques comportant sur une feuille support amagnétique un dépôt tramé et de densité surfacique variable d'un matériau ferromagnétique adapté à la correction des défauts de champ magnétique dus aux inhomogénéités de perméabilité et  
25           de planéité des pièces polaires.

          De toute façon, l'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit de plusieurs modes de mise en oeuvre, description qui sera  
30           faite à titre surtout illustratif et non limitatif en se référant aux figures 1 à 9 ci-jointes sur lesquelles :

- la figure 1 est une vue d'ensemble en perspective vue par la face avant d'un système à aimants permanents objet de l'invention ;

35           - la figure 2 est une vue en coupe du systè-

me à aimants de la figure 1 montrant le circuit magnétique de la structure en question ;

5 - la figure 3 montre en élévation un schéma simplifié d'un système à aimants permanents selon l'invention comportant des moyens de compensation de la fuite de flux magnétique à la périphérie des pièces polaires ;

10 - la figure 4 représente un système à aimants permanents selon l'invention équipé de moyens de correction de la chute de potentiel magnétique dans les pièces polaires,

15 - la figure 5 représente un autre mode de compensation sur une structure à aimants permanents conforme à l'invention, de la chute du potentiel magnétique dans les pièces polaires ;

- la figure 6 est un schéma montrant le positionnement d'aimants compensateurs contre les blocs magnétisants de la structure ;

20 - la figure 7 est un schéma montrant la réalisation d'une des plaques précédentes ;

25 - la figure 8 est un schéma de plaques compensatrices utilisées pour pallier les inhomogénéités de perméabilité et de planéité des pièces polaires dans le cas où l'on doit ajouter des surépaisseurs importantes ;

- la figure 9 représente une plaque de même nature dans le cas où l'on se contente d'ajouter une surépaisseur faible.

30 Sur la figure 1, on a représenté, vu de face en perspective, un système à aimants permanents conforme à l'invention comportant ses deux pièces polaires supérieure 1 et inférieure 2 de forme générale parallélépipédique rectangle en un matériau ferromagnétique de très forte perméabilité. La structure est  
35 complétée latéralement par deux blocs magnétisants 3

et 4 également de forme parallélépipédique rectangle en des matériaux aimantés qui sont le siège de la force magnétomotrice destinée à produire le champ dans l'entrefer 5 en forme de tunnel, délimité précisément par les pièces polaires 1 et 2 et les blocs aimantés 3 et 4. Ces derniers blocs 3 et 4 sont constitués le plus souvent par la juxtaposition de colonnes constituées chacune d'un empilement de briques magnétiques élémentaires telles que 3a, 3b, 3c, ... etc 4a, 4b, 4c... etc qui servent ainsi également d'entretoises et de soutien aux pièces polaires 1 et 2. Ces colonnes ne sont pas nécessairement jointives.

L'entrefer en forme de tunnel 5 destiné au logement éventuel de tout ou partie d'un corps humain, possède, à cet effet une largeur et une hauteur minimales de l'ordre de 400 mm.

Sur la figure 2, on a représenté en coupe selon un plan vertical la structure de la figure 1 pour préciser la répartition du flux magnétique et des lignes de champ à l'intérieur du système. Sur cette figure, on voit d'abord les dimensions  $S_0$  et  $S_A$  dont il a été question précédemment, ainsi que, marquée par des flèches, l'induction magnétique circulant dans les blocs aimantés 3 et 4 ainsi que dans les pièces polaires 1 et 2. Comme indiqué dans le cas de la figure 2, le champ magnétique  $H_0$  dans le tunnel 5 est dirigé verticalement de bas en haut, c'est-à-dire de la pièce polaire 1 vers la pièce polaire 2.

Sur la figure 3, on a représenté en coupe schématique un système à aimant permanent selon l'invention dans lequel on retrouve les deux pièces polaires 1 et 2 et les blocs d'aimants 3 et 4 avec les indications de leur polarité. Cette structure est munie d'un certain nombre de moyens pour compenser selon l'invention les inhomogénéités liées à la fuite du flux magnétique qui se produit de façon inévitable à la périphérie des pièces polaires 1 et 2 et qui se

traduit par une déformation des lignes de champ "en tonneau" conduisant à une valeur maximale du champ au centre du tunnel 5. Selon l'invention, cette compensation est obtenue en augmentant localement le flux à la périphérie de l'entrefer par des anneaux de garde ou ceintures 6 en matériau ferromagnétique doux réduisant localement l'entrefer. Les pièces 6 peuvent être continues ou non sur la périphérie de la structure et notamment être conçues sous une forme fixe ou réglable par déplacement.

Une compensation du même type de la fuite du flux magnétique peut être obtenue également à l'aide de blocs aimantés 7 disposés le long de la périphérie externe des blocs aimantés 3 et 4, leur aimantation étant parallèle et de même sens que celle desdits blocs 3 et 4. Le plus généralement, les blocs aimantés 7 sont discontinus et répartis expérimentalement à certains endroits du pourtour de la structure. Les lignes de champ ainsi produites par les blocs aimantés 7 ont une courbure inverse de celle du champ principal induit par les blocs aimantés 3 et 4.

Selon l'invention, les anneaux de garde 6 et les blocs aimantés 7 peuvent être employés soit de façon séparée, soit simultanément, sur une structure déterminée.

Sur la figure 4 on a représenté une première série des moyens prévus dans le cadre de la présente invention pour obtenir une compensation des effets néfastes dus à la chute de potentiel magnétique dans les pièces polaires 1 et 2 lesquelles véhiculant transversalement le flux magnétique conduisent à une déformation des lignes de champ "en barrillet" et à un champ magnétique minimum au centre de l'entrefer en forme de tunnel 5.

La chute de potentiel dans les pièces polai-

res 1 et 2 due à leur réluctance non nulle, est soumise à des variations d'une réalisation à l'autre et également dans le temps. Il est donc intéressant d'en minimiser les effets d'une façon générale et de la compenser si possible de manière réglable. D'une façon générale par conséquent, on recherche d'abord à en minimiser les conséquences en réalisant :

- un tunnel 5 de largeur minimale, ce qui va d'ailleurs dans le sens favorable de la compacité des aimants 3 et 4 ;

- des pièces polaires 1 et 2 en un matériau très doux et à perméabilité la plus élevée possible ;

- une épaisseur élevée pour les pièces polaires de façon à ce que l'induction dans ces pièces polaires soit la plus faible possible ;

- le choix convenable de la courbe d'aimantation.

En effet, les conséquences de cette chute de potentiel magnétique sont d'autant plus importantes que l'on se situe sur la courbe de première aimantation du matériau constituant les pièces polaires. Il est donc très utile de réaliser un cyclage magnétique de celles-ci pour ne pas rester sur la courbe de première aimantation, ce que l'on peut réaliser de deux façons différentes. Dans certains cas on fait passer simplement dans le tunnel 5 de l'aimant une pièce ferromagnétique qui augmente transitoirement le flux d'un facteur important, 2 par exemple, mais ceci a l'inconvénient de nécessiter le maniement d'une charge métallique en général très lourde. C'est pourquoi on préfère parfois utiliser pendant le montage de la structure des entretoises métalliques ou plaques qui servent de soutien aux pièces polaires 1 et 2 et les retirer une fois le montage effectué. Le résultat recherché est obtenu alors par l'effet inverse conduisant à une di-

minution du flux importante.

5 Ces diverses précautions qui peuvent être prises lors de la fabrication ou de la construction du système à aimants permanents peuvent être complétées, selon l'invention, par des moyens placés in situ dans la structure et qui sont représentés en se référant aux figures 4 à 5.

10 Sur la figure 4 deux d'entre eux sont visibles. Le premier moyen consiste en bandes de matériaux 8 à grande perméabilité, fixées sur la partie médiane des pièces polaires 2 et 3 dans l'entrefer 5 en forme de tunnel. Cette compensation qui vise à augmenter le champ au centre de l'entrefer est très efficace mais bien entendu difficilement réglable.

15 Un autre moyen utilisé dans le cadre de l'invention est constitué par des bobinages 9 et 10 qui encerclent les pièces polaires 1 et 2 (seuls les bobinages concernant la pièce polaire 1 sont représentés sur la figure 4). Ces bobinages 9 et 10 sont parcourus par un courant que l'on fait circuler dans un sens tel qu'il crée une force magnétomotrice opposée à la chute de potentiel magnétique due à la circulation du flux dans la pièce polaire correspondante. La répartition spatiale de ces bobinages 9 et 10 est calculée pour compenser au mieux cette chute de potentiel magnétique et l'ajustement des courants qui parcourent chacune des bobines permet d'optimiser l'homogénéité de l'induction dans le tunnel 5. Sur la figure 4, on a montré par des flèches la direction du champ magnétique créé par les bobines 9 et 10, et l'on voit par simple comparaison avec le schéma de la figure 2 que ce champ magnétique est antagoniste du champ magnétique principal créé par les blocs aimantés 3 et 4.

20 25 30 35 Sur la figure 5, où l'on retrouve les éléments principaux de la structure à aimants permanents



objet de l'invention, on a représenté un mode de mise en oeuvre particulier des pièces polaires 1 et 2 qui conduit à un autre procédé de compensation des inhomogénéités dues à la chute de potentiel magnétique dans ces pièces polaires 1 et 2. A cet effet, et conformément à l'invention, chacune des pièces polaires 1 et 2 est divisée en deux plaques l'une externe (1a, 2a), l'autre interne (1b, 2b) séparées l'une de l'autre par un entrefer 11 et 12 de faible épaisseur, quelques mm par exemple. Cet entrefer est obtenu à l'aide de cales telles que 13, 14, 15 et 16 en un matériau perméable au flux magnétique. Les cales 13, 14, 15, 16 précédentes sont pratiquement situées dans le prolongement des blocs d'aimantation 3 et 4 et participent ainsi directement à la transmission du flux aux pièces polaires. Selon l'invention quatre bobines 17, 18, 19 et 20 entourent les plaques externes 1a et 2a des pièces polaires correspondantes et sont parcourues par un courant créant un champ magnétique circulant selon les trajets marqués sur la figure 5, c'est-à-dire, dans une direction parallèle au flux principal pour les plaques externes 1a et 2a et antagoniste à ce même flux principal pour les plaques internes 1b et 2b. De cette façon, on impose au flux magnétique principal de transiter préférentiellement par les plaques extérieures 1a et 2a plutôt que par les plaques intérieures 1b et 2b. Les plaques polaires internes 1b et 2b jouent ainsi le rôle de filtre pour les différences de potentiel magnétique résiduel.

Les courants qui parcourent les bobines 17, 18, 19 et 20, sont ajustés pour obtenir l'homogénéité maximum du champ magnétique dans l'entrefer 5. Ils ont à fournir la force magnétomotrice juste nécessaire pour faire circuler le flux dans la plaque externe 1a et dans l'entrefer 11. L'entrefer 11 est choisi suffi-

samment petit pour qu'il puisse, sans perturber gravement le flux principal, provoquer néanmoins l'uniformisation nécessaire du passage du flux de la plaque externe 1a vers la pièce polaire 1b.

5 La réalisation des ensembles magnétisants 3 et 4 fait appel à des empilements de briques plates 3a, 3b, ..., 4a, 4b, sous forme de colonnes montées côte à côte.

10 Il est important que chaque colonne soit montée avec des briques dont l'induction soit la plus identique possible pour éviter de faire apparaître des dipôles magnétiques non compensés qui engendreront un champ perturbateur. Au montage la mesure de chaque  
15 brique est nécessaire. Les différences entre colonnes ne créent presque pas de perturbations car elles sont filtrées par les pièces polaires.

Selon l'invention, les inhomogénéités de l'induction, engendrées à l'intérieur du tunnel 5 par les dipôles magnétiques subsistant à l'intérieur des  
20 blocs magnétiques 3 et 4, sont compensées par un ensemble de petits aimants judicieusement positionnés qui créent, dans ce tunnel 5, un réseau de lignes de champ opposées aux lignes de champ parasites.

25 Le positionnement de ces aimants compensateurs est réalisé comme on le voit sur la figure 6, en collant sur des plaques amagnétiques 21, par exemple en matière plastique, des petits aimants parallélépipédiques 22 tels qu'on les voit sur la figure 7, de  
30 taille standard. Sur chacune des plaques 21 sont collés un certain nombre de ces petits aimants standard 22 suivant une grille de coordonnées cartésiennes dont chacun des sommets comporte la présence ou l'absence d'un tel aimant 22, l'orientation vers le haut ou vers le bas de chacun d'eux étant également différente et

calculée en fonction de l'effet à obtenir. Les plaques 21 ainsi équipées de leurs aimants correcteurs 22 sont appliquées sur les parois latérales internes du tunnel 5 contre les blocs magnétisants 3 et 4. La répartition des aimants 22 sur chaque plaque 21 est effectuée par un calcul numérique d'ordinateur à partir du relevé de la carte d'induction effectué dans des plans verticaux 23 parallèles aux parois des blocs magnétiques 3 et 4 et situés à une distance de celles-ci de l'ordre de 3 à 4 mm.

Enfin, il est utile, selon l'invention, de corriger l'inhomogénéité causée par les défauts de perméabilité et/ou de planéité des pièces polaires 1 et 2 de la structure à aimant permanent.

Selon l'invention, on corrige ces inhomogénéités en les compensant par une déformation de la surface interne des pièces polaires elles-mêmes. Cette déformation est obtenue en plaquant contre les pièces polaires une fine feuille 24 d'un matériau amagnétique (tel qu'un support plastique ou en résine époxy) recouverte d'une feuille ferromagnétique de fer ou de nickel. La feuille magnétique est photogravée selon un tramé visible sur les figures 8 et 9 et dont la densité surfacique locale (rapport des surfaces gravées aux surfaces non gravées) est calculée par ordinateur à partir d'une carte de champ mesurée à faible distance des pièces polaires. Les supports plastiques 24 comportent, centrées au sommet d'un réseau cartésien régulier, un certain nombre de pastilles de surépaisseur en matériau ferromagnétique telles que 25 ou 26 dont l'épaisseur est constante et la surface variable d'un point à un autre, en fonction de l'effet correcteur recherché et calculé par ordinateur. La fixation des supports plastiques 24 sur les pièces polaires peut être assurée simplement par la pression magnétique.

Des variantes de cette méthode peuvent être utilisées qui consistent à réaliser les compensations magnétiques nécessaires non plus par des plots ou des pastilles de forme régulière, mais par des fils magnétiques de nickel ou de fer fixés à la surface, de façon à produire les corrections de champ recherchées.

REVENDEICATIONS

1. Système à aimants permanents destiné à l'imagerie par résonance magnétique nucléaire, notamment pour l'examen du corps humain, caractérisé en ce qu'il comporte deux pièces polaires horizontales opposées et parallèles (1, 2) en forme de parallélépipède rectangle, en un matériau ferromagnétique de très forte perméabilité, positionnées l'une au-dessus de l'autre et polarisées à un potentiel magnétique par deux blocs parallélépipédiques de matériaux aimantés (3, 4) définissant entre eux et avec les pièces polaires un entrefer central (5) de forme également parallélépipédique servant de logement au corps humain à examiner.

2. Système à aimants permanents selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte des anneaux de garde (6) en matériau ferromagnétique et/ou des blocs aimants (7) répartis sur la périphérie externes pour compenser la fuite du flux magnétique à la périphérie des pièces polaires (1, 2).

3. Système à aimants permanents selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que pour compenser la chute de potentiel magnétique dans les pièces polaires (1,2) il comporte au moins l'un des moyens choisis dans le groupe comprenant des bandes de matériau à grande perméabilité (8) placées dans l'entrefer selon la zone médiane des pièces polaires, des bobinages (9, 10) encerclant les pièces polaires et parcourus par un courant dont le sens crée une force magnétomotrice opposée à la chute de potentiel des pièces polaires (1, 1a) divisées horizontalement par un petit entrefer (11) en deux plaques dont la plaque extérieure (1a) est entourée de bobines (17, 18) parcourues par un courant.

4. Système à aimants permanents selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il comporte placés contre les parois verticales latérales de l'entrefer (5) des aimants compensateurs (21, 22) de l'inhomogénéité des blocs de matériaux aimantés.

5. Système à aimants permanents selon la revendication 4, caractérisé en ce que les aimants compensateurs (22) sont réalisés par collage sur une plaque support amagnétique (21) de petits aimants parallélépipédiques standard, dont la répartition et le sens sur le support sont choisis en fonction des défauts repérés dans la carte de l'induction dressée selon des plans verticaux (21) parallèles aux parois des blocs de matériaux aimantés.

6. Système à aimants permanents selon l'une quelconques des revendications 1 à 5 précédentes, caractérisé en ce que les pièces polaires (1, 2) sont recouvertes de plaques (24) comportant sur une feuille support amagnétique (24) un dépôt (25, 26) tramé et de densité surfacique variable d'un matériau ferromagnétique adapté à la correction des défauts de champ magnétique dus aux inhomogénéités de perméabilité et de planéité des pièces polaires.

1,4

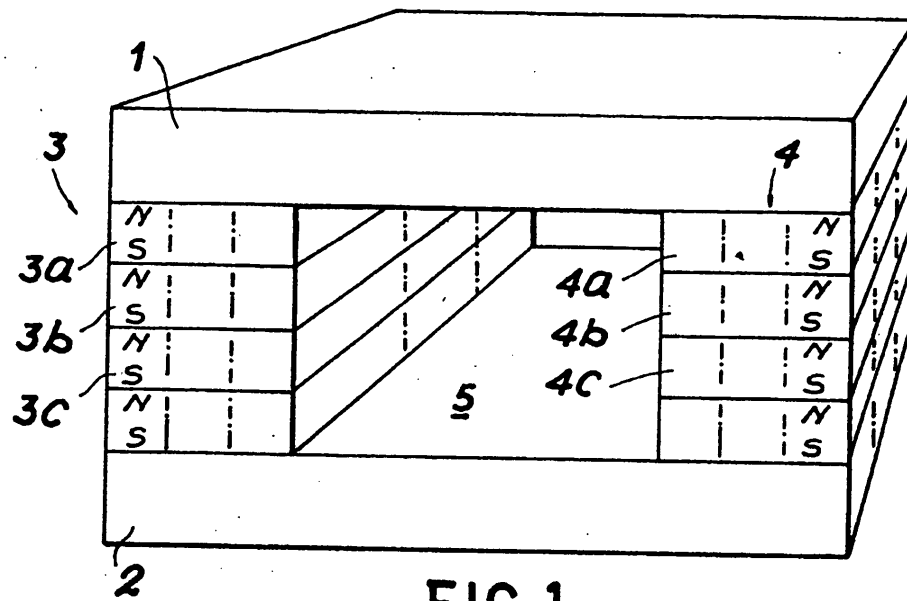
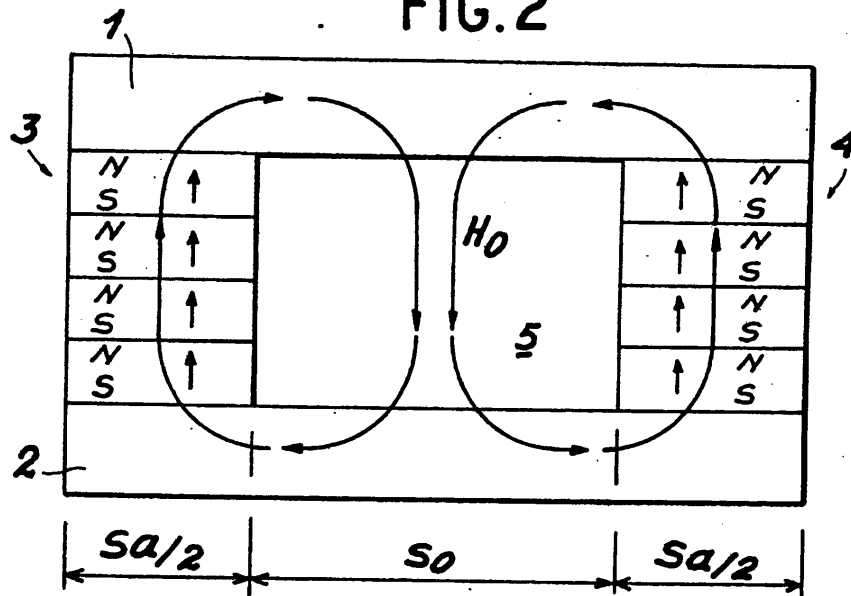


FIG. 1

FIG. 2



2,4

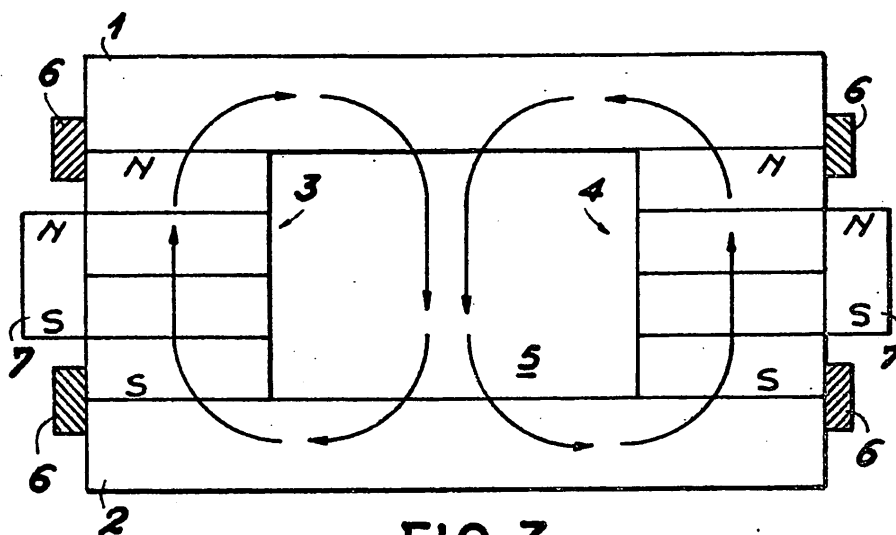


FIG. 3

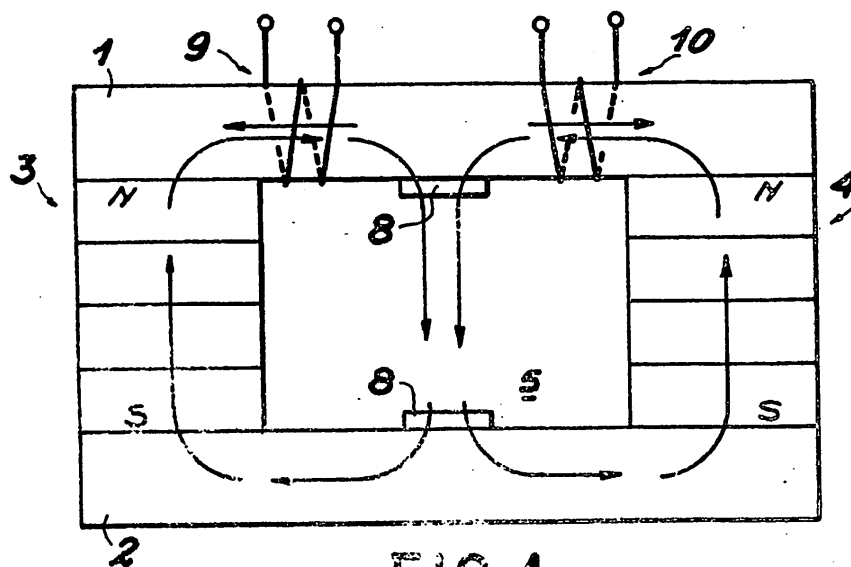


FIG. 4



3/4

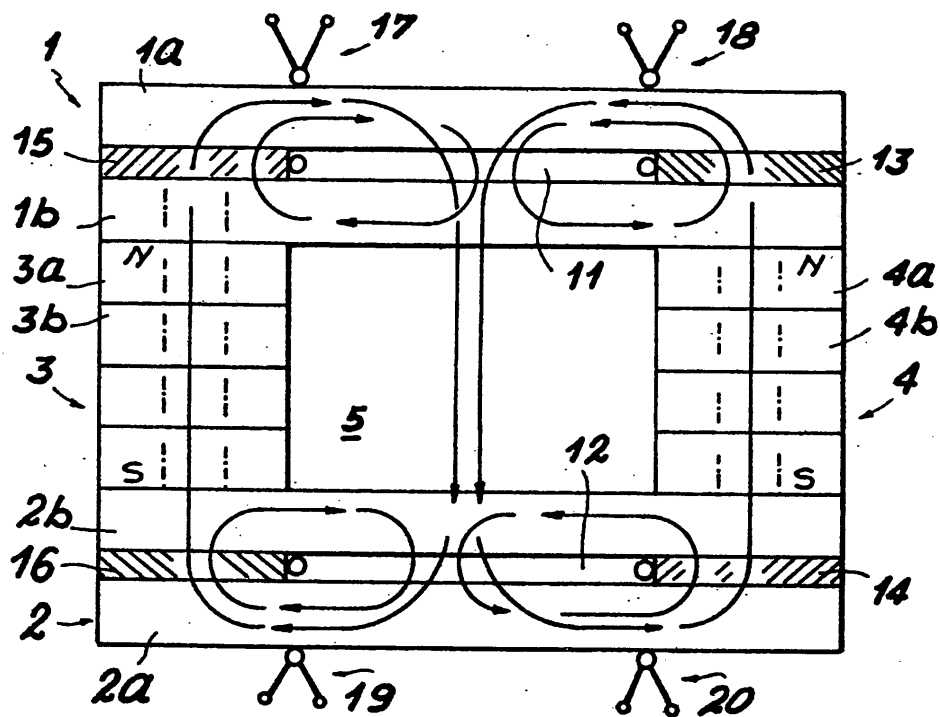


FIG. 5

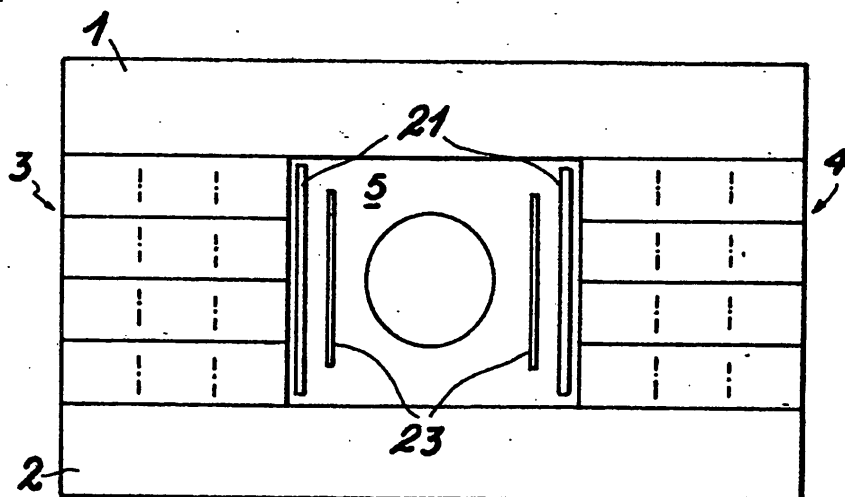


FIG. 6

4.4

